

Inestabilidad de laderas en el APRN Cuenca del Río Necaxa Slope instability in the Necaxa River Basin NRPA

E. K. Aguilar-Anzures ^a, E. Anzures-Vázquez ^b

^aIngeniería en Geología Ambiental, Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

^bÁrea de Protección de Recursos Naturales Zona Protectora Forestal Vedada Cuenca Hidrográfica del Río Necaxa, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 73172, Huauchinango, Puebla, México.

Resumen

En este estudio, se evaluó la inestabilidad de laderas dentro del Área Natural Protegida de la Cuenca Hidrográfica del Río Necaxa mediante el análisis de la susceptibilidad y la caracterización física de casos de remoción en masa ocurridos entre 2006 y 2024. La metodología empleada se basa en la propuesta del Centro Nacional de Prevención de Desastres para la creación de mapas de riesgo por inestabilidad de laderas a nivel regional. Los resultados indican que las pendientes mayores a 45°, las características geológicas y del relieve, la cercanía a la red de canales de drenaje fluvial y la presencia de asentamientos urbanos y vías terrestres son los principales condicionantes de la inestabilidad de laderas. Adicionalmente, se identificó que las lluvias intensas a torrenciales, con un valor acumulado cercano a los 145 mm por día, constituyen el principal factor desencadenante de los deslizamientos de tierra más desastrosos en el área de estudio.

Palabras Clave: procesos de remoción en masa, sistemas de información geográfica, inestabilidad de laderas, área natural protegida

Abstract

In this study, the instability of slopes within the Necaxa River Basin Protected Natural Area was evaluated through susceptibility analysis and the physical characterization of mass removal cases occurring between 2006 and 2024. The methodology employed is based on the proposal by the National Center for Disaster Prevention for the creation of regional-level landslide risk maps. The results indicate that slopes greater than 45°, geological and topographic characteristics, proximity to the fluvial drainage network, and the presence of urban settlements and roads are the main factors contributing to slope instability. Additionally, heavy to torrential rains, with an accumulation of nearly 145 mm per day, were identified as the primary triggering factor for the most disastrous landslides in the study area.

Keywords: mass movement processes, geographic information systems, slope instability, protected natural area

1. Introducción

Los Procesos de Remoción en Masa (PRM) son definidos como movimientos descendentes de un volumen de material constituido por suelo y roca, a lo largo de una ladera por acción de la gravedad (Alcántara-Ayala, 2000; Cruden, 1991). Se consideran entre los fenómenos geológicos más peligrosos y destructivos del país (González-Huesca *et al.*, 2015), especialmente debido a su frecuente ocurrencia en las proximidades de comunidades y carreteras, resultando en pérdidas materiales, humanas y de recursos naturales. La susceptibilidad a estos desastres está condicionada por diversos factores, como el relieve,

litología, características hidrogeológicas, vegetación, geomorfología y clima (Lario-Gómez y Bardají-Azcárate, 2017), factores que no deben confundirse con los desencadenantes, como la actividad volcánica, sísmica o lluvias torrenciales.

La principal preocupación para la comunidad, en el contexto de los PRM, se encuentra en la creación de áreas de viviendas y otros proyectos de construcción en regiones propensas a deslizamientos de tierra, donde no se aplican restricciones adecuadas. Este desafío surge debido a la falta de estudios suficientes y a la limitada divulgación de información, así como a la falta de coherencia en las políticas de planificación territorial, tanto

*Autor para correspondencia: ag354753@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: ag354753@uaeh.edu.mx (Eli Kenneth Aguilar-Anzures), eanzures@conanp.gob.mx (Elimelec Anzures-Vázquez).

Historial del manuscrito: recibido el 06/08/2024, última versión-revisada recibida el 25/06/2025, aceptado el 11/07/2025, en línea (postprint) desde el 12/09/2025, publicado el DD/MM/AAAA. DOI:<https://doi.org/10.29057/icbi.v13i26.13493>



en entornos urbanos como rurales (Paz-Tenorio *et al.*, 2017).

Ante este panorama, surge la necesidad imperante de llevar a cabo estudios de identificación de zonas de riesgo, así como el registro de eventos para su mapeo y predicción (García-Rodríguez, 2017). Es en este contexto que se plantea este estudio, con el objetivo de realizar un análisis preliminar sobre la inestabilidad de laderas en la región que abarca el Área de Protección de Recursos Naturales Cuenca Hidrográfica del Río Necaxa. Este análisis cobra especial relevancia debido a que la zona de estudio incluye asentamientos humanos tanto rurales como urbanos de doce municipios diferentes, algunos que han sido afectados directamente por la ocurrencia de PRM. Además, engloba todos los recursos forestales, de flora y fauna presentes en las más de cuarenta y dos mil hectáreas que cubre el Área Natural Protegida (ANP).

Es crucial destacar un estudio previo en la región, de García-Rodríguez (2017), que emplea sistemas de información geográfica (SIG), algoritmos de minería de datos y diferentes métodos estadísticos para la predicción de deslizamientos de tierra en el Sistema Hidrológico Necaxa, a partir de variables naturales intrínsecas del terreno, como la inclinación de los taludes, la orientación de las laderas y la cobertura del suelo, entre otras. Sin embargo, el presente estudio adopta la metodología del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) para evaluar la inestabilidad de laderas mediante el análisis de la susceptibilidad, conforme a la “Guía Básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos”. Este método también se basa en el análisis de los factores condicionantes del terreno, pero adicionalmente se incluye un análisis complementario que permite identificar aquellos factores que desencadenaron los PRM (González-Huesca *et al.*, 2015; Mendoza y Domínguez, 2006; Uribe-Alcántara *et al.*, 2019).

2. Antecedentes

Los numerosos casos de PRM ocurridos los días 4 y 5 de octubre de 1999 en la Sierra Norte de Puebla representan el precedente más significativo de inestabilidad de laderas en la región, tanto por las víctimas involucradas como por los daños económicos causados. Este evento ha sido ampliamente estudiado y se atribuye principalmente a lluvias torrenciales que tuvieron una duración de tres días, originadas por la depresión tropical número 11, las cuales además provocaron desbordamientos de ríos e inundaciones que afectaron a 81 municipios (Galindo-Serrano y Alcántara-Ayala, 2015; Lugo-Hubp *et al.*, 2005).

Otros antecedentes en la zona de Necaxa y Huauchinango, Puebla, también indican que las intensas lluvias, principalmente asociadas con fenómenos hidrometeorológicos, son desencadenantes recurrentes de PRM. Ejemplos notables incluyen los eventos del 6 de agosto de 2016 en Xaltepec, Huauchinango (Municipios, 2016), donde el huracán Earl provocó la pérdida de al menos veinte vidas humanas debido al flujo de grava y lodo de los Cerros Frío y Grande, así como el deslizamiento de tierra en Cuaxicala el 14 de septiembre de 2013 (Municipios, 2013), dejando expuestos ductos de hidrocarburos.

Aunque existen eventos puntuales que han sido documentados y extensamente estudiados al interior del ANP, como el

del 7 de septiembre de 2006 en Necaxa, Puebla (En el kilómetro 106 de la carretera federal México-Tuxpan) (Domínguez-Morales, 2021), donde cuatro personas perdieron la vida y seis vehículos resultaron siniestrados, se sigue evidenciando la necesidad de enfoques preventivos y de evaluación de riesgos.

3. Zona de estudio

3.1. Localización

La región de interés abarca la totalidad del Área de Protección de Recursos Naturales (APRN) Zona Protectora Forestal Vedada (ZPFV) Cuenca Hidrográfica del Río Necaxa (CHRN), la cual constituye un Área Natural Protegida (ANP) situada al noroeste del estado de Puebla y al sureste del estado de Hidalgo. Se localiza entre las coordenadas UTM 580803 m E, 2218948 m N y 619910 m E, 2239307 m N, de la zona 14 N. Esta extensa área comprende un total de 42,129.35 hectáreas e involucra los municipios de Acaxochitlán y Cuauhtepic de Hinojosa en el estado de Hidalgo, y Naupan, Huauchinango, Juan Galindo, Xicotepet, Zihuateutla, Tlaola, Chiconcuautla, Jolaplan, Zacatlán y Ahuazotepec en el estado de Puebla (CONANP, 2010). El acceso principal a la zona se realiza a través de la carretera federal México-Tuxpan y la autopista México-Tuxpan (CONANP, 2013) (ver figura 1).

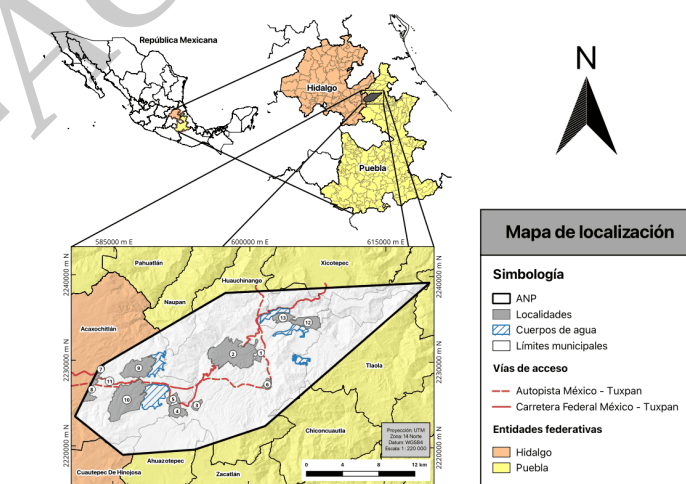


Figura 1: Mapa que muestra localización del área de estudio, las principales vías de acceso, y los límites estatales y municipales que tienen influencia sobre el ANP. Localidades: 1-Cuacuila, 2-Huauchinango, 3-Venta Grande, 4-Mesa de Capulines, 5-La Bóveda, 6-Xilocuautla, 7-Acaxochitlán, 8-Tlamimilolpa, 9-Los Reyes, 10-Tepepa (Santiago Tepepa), 11-Tlaltegco (Venta Quemada), 12-Tenango de las Flores y 13-Nuevo Necaxa. Elaboración propia con información de INEGI (2013a) e INEGI (2013b).

3.2. Clima

El APRN presenta tres climas generales: 1) Templado húmedo, 2) Templado subhúmedo y 3) Semicálido húmedo. El clima predominante es el templado húmedo, que se distribuye en la zona central del ANP y cubre el 70 % de la superficie total. El régimen de lluvias para este clima ocurre a lo largo del año, con una precipitación anual total que varía entre 1,200 mm y 3,000 mm de lluvia acumulada durante todo el año. El clima templado subhúmedo abarca el 5 % de la superficie del ANP y

se localiza al suroeste, en la porción Hidalguense, con una precipitación promedio anual de 1,200 mm. Por su parte, el clima semicálido húmedo se encuentra al noreste del ANP y cubre el 25 % restante de la superficie (CONANP, 2013).

La zona central, donde predomina el clima templado húmedo, es la que recibe más lluvia a lo largo del año, presentando el mayor régimen de precipitación anual. A pesar de que las características del clima dominante en el ANP sugieren una distribución uniforme de lluvias durante todo el año, existen eventos puntuales con lluvias extraordinarias que se asocian a algunos de los casos de PRM más relevantes.

Según el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), estas lluvias pueden clasificarse en función de su intensidad, es decir, la cantidad de lluvia medida en milímetros (mm) que se acumula en un lapso de 24 horas, en los siguientes tipos: lluvias torrenciales (>150 mm), lluvias intensas (75 a 150 mm) y lluvias muy fuertes (50 a 75 mm) (SMN, 2024).

3.3. Contexto geológico y geomorfológico

El ANP se encuentra dentro de las provincias geológico-geomorfológicas Sierra Madre Oriental (SMO), en su extremo meridional, que se conoce a nivel regional como Sierra Norte de Puebla (SNP), y dentro de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) (ver figura 2). La primera se encuentra en la parte noreste, centro-norte y centro-sur del área de estudio y se constituye principalmente por rocas sedimentarias del Mesozoico, específicamente por calizas y lutitas de origen marino. Por otro lado, la FVTM se presenta en la porción suroeste y está representada por masas de rocas volcánicas y derrames de lavas del Neógeno-Cuaternario (CONANP, 2013; Lugo-Hubp *et al.*, 2005; Alcantara-Ayala, 2004).

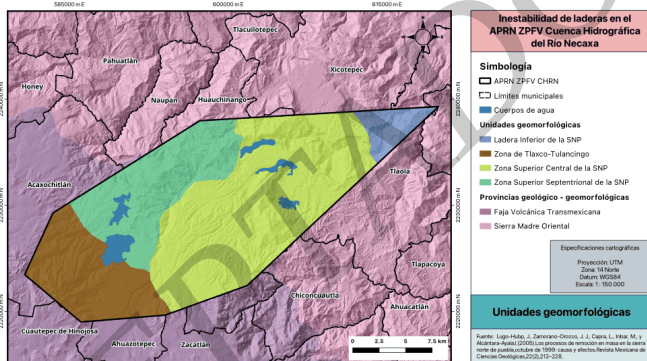


Figura 2: Mapa que muestra las unidades geomorfológicas principales del ANP. Modificado de Lugo-Hubp *et al.* (2005).

De acuerdo con García-Rodríguez (2017), superficialmente, la unidad litológica predominante en el ANP corresponde a una secuencia de calizas y lutitas marinas de las formaciones Tamán y Pimienta, ambas del Jurásico superior. Sin embargo, en la zona centro-norte y centro-noroeste, se encuentran lutitas y limolitas de la Formación Huayacocotla, del Jurásico inferior, subyaciendo a una secuencia de limolitas con areniscas y conglomerados de la Formación Cahuasas, del Jurásico medio. En la zona centro-este y noroeste se encuentran calizas del

Cretácico inferior, que corresponden a la Formación Tamaulipas Inferior, y calizas, margas y lutitas del Cretácico superior, que corresponden a las formaciones San Felipe y Méndez. Al suroeste, predomina una secuencia de rocas volcánicas de edades Neógeno-Cuaternario que sobreyacen a las rocas del Jurásico y del Cretácico. Corresponden principalmente a piroclastos de dacitas, ignimbritas, tobas ácidas, basaltos y andesitas (ver figura 3).

La distribución de las unidades litológicas superficiales se encuentra estrechamente vinculada con las formas del relieve. Es así que, dentro de la clasificación del relieve de la SNP de Lugo-Hubp *et al.* (2005) (ver figura 2), las zonas que corresponden a la Ladera Superior, en sus porciones central y septentrional, y la Ladera inferior de la SNP exhiben un relieve definido por la presencia de formas vinculadas con estructuras plegadas, presencia de fallas y erosión diferencial, que constituye el relieve característico de la SMO, conformado por valles y barrancos (Zamorano *et al.*, 2016; Alcantara-Ayala, 2004).

De manera precisa, el área de la Ladera Superior se distingue por una profundidad más pronunciada en los barrancos y cauces, atribuida a la configuración morfológica de pliegues y fracturas, y por ende una mayor inclinación de los taludes.

La Ladera Inferior de la SNP, situada al noreste del ANP (ver figura 2), se caracteriza por una reducción tanto en la cantidad como en la profundidad de los valles fluviales, junto con un régimen de erosión más moderado, en comparación con la Ladera Superior. Por otro lado, en la región suroeste del ANP se encuentra representada la provincia geológica y geomorfológica de la FVTM por el área de Tlaxco-Tulancingo, en donde prevalece un relieve definido por la presencia de estructuras volcánicas precuaternarias, destacando conjuntos montañosos de corta longitud, planicies formadas por tobas y coladas lávicas de composición ácida e intermedia, conos volcánicos con distinto grado de erosión y barrancos con erosión remontante creciente hacia el suroeste (Zamorano *et al.*, 2016; Lugo-Hubp *et al.*, 2005; CONANP, 2013).

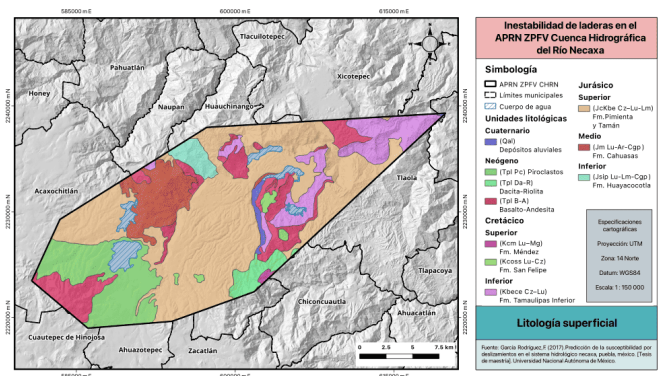


Figura 3: Mapa que muestra la distribución de las unidades litológicas superficiales en el ANP. Modificado de García-Rodríguez (2017).

4. Materiales y métodos

4.1. Mapa de susceptibilidad

La evaluación de la inestabilidad de laderas dentro del ANP se basó en las directrices proporcionadas por el CENAPRED,

según lo descrito en el “Proyecto de Generación de Insumos para el Atlas Nacional de Riesgos y el Mapa Nacional de Susceptibilidad por Inestabilidad de Laderas”, y en parte en la “Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Fenómenos Geológicos” (Mendoza y Domínguez, 2006; González-Huesca *et al.*, 2015), la cual también fue parcialmente aplicada y descrita por Uribe-Alcántara *et al.* (2019).

Esta metodología consiste en la evaluación de la susceptibilidad y peligrosidad por inestabilidad de laderas, mediante la creación de mapas a escala regional ($\leq 1:100,000$) que permitan identificar las áreas donde las condiciones del terreno favorecen la ocurrencia de estos procesos geológicos. La susceptibilidad a la inestabilidad de laderas hace referencia a la propensión de un terreno a ser inestable. Este enfoque únicamente considera a los factores condicionantes de la inestabilidad, y excluye completamente los factores desencadenantes de los PRM (González-Huesca *et al.*, 2015).

El análisis de la susceptibilidad consiste en la cuantificación relativa de la importancia que puede tener cada uno de los factores condicionantes, en la posibilidad de que se produzcan fenómenos de inestabilidad de laderas.

Así, entonces, para la generación del mapa que representa los resultados de dicho análisis, se combinan las cartografías de los factores condicionantes, asignando un peso relativo a cada factor según su contribución a la inestabilidad. La suma aritmética de estas contribuciones da como resultado los valores finales de susceptibilidad. Esta tarea se realiza mediante la aplicación de Sistemas de Información Geográfica (SIG), ya que facilitan el manejo y procesamiento de la información cartográfica digital.

En este estudio se utilizó el software libre QGIS, versión 3.32. Los factores condicionantes considerados incluyeron la pendiente, características geológicas (litología) y la cobertura vegetal y uso de suelo, estos últimos como una sola capa de información. Estas variables fueron seleccionadas siguiendo estrictamente la metodología adoptada, la cual menciona que constituyen los tres factores básicos para la realización del análisis. Los valores de pendiente en grados se calcularon a partir de los datos del Continuo de Elevación Mexicano Nacional 3.0 (CEM), que poseen una resolución de 30 x 30 m (Uribe-Alcántara *et al.*, 2019). Respecto a la litología, se digitalizó el mapa de litología superficial a escala 1:150,000 propuesto por García-Rodríguez (2017) (ver figura 3). Para la cobertura vegetal y el uso del suelo, se emplearon datos de tipo vectorial a escala 1:250,000, que fueron proporcionados por la dirección del ANP mediante una petición formal.

Una vez recopilada la información cartográfica, con ayuda del SIG, se asignaron los valores de susceptibilidad relativa a cada polígono de la información vectorial de las tres cartografías. Para los factores de pendiente y de uso de suelo y vegetación, se siguieron las categorías y atributos descritos en la tabla 1.

Por otro lado, en la asignación de los atributos de susceptibilidad para el factor de litología, fue crucial considerar el grado de alteración de las rocas. Para ello, se adoptó el enfoque propuesto por Uribe-Alcántara *et al.* (2019), que asigna atributos no solo en función del tipo de roca, sino también mediante la inclusión de un factor adicional que refleja el nivel de meteorización.

De este modo, el valor final de susceptibilidad relativa se calcula multiplicando el atributo original por este factor de meteorización. Las categorías correspondientes a los tipos de roca, junto con los atributos originales y sus respectivos factores de meteorización, se detallan en la tabla 2. Debido a la falta de información vectorial sobre el grado de meteorización de las rocas a nivel regional, se utilizó el factor de meteorización más alto para representar las condiciones máximas de alteración en cada tipo de litología.

Tabla 1: Valores de susceptibilidad relativa asignados a los factores de pendiente, y de vegetación y uso de suelo, utilizados en la evaluación de la susceptibilidad a la inestabilidad de laderas a escala regional. Modificado de González-Huesca *et al.* (2015).

Factor	Categorías	Atributo
Pendiente	> 45°	2.0
	35° - 45°	1.8
	25° - 35°	1.4
	15° - 25°	1.0
	< 15°	0.5
Uso de suelo y Vegetación	Zona urbana	2.0
	Cultivos anuales	1.5
	Área deforestada	2.0
	Vegetación moderada	0.8
	Vegetación intensa	0.0

Tabla 2: Valores de susceptibilidad relativa utilizados para el factor de litología, en función del tipo de roca. Modificado de Uribe-Alcántara *et al.* (2019).

Tipo de roca	Atributo original	Factor adicional por meteorización
Rocas metamórficas	1.6	Multiplicar por 1.2 a 1.5, según el grado de meteorización
Rocas sedimentarias y tobos competentes	0.5	
Rocas ígneas	0.3	Multiplicar por 2 a 4, según el grado de meteorización

Cabe mencionar que, en la metodología propuesta por CENAPRED, este procedimiento se basa en un análisis detallado de casos de inestabilidad, lo que permite diferenciar un porcentaje de peso en el análisis para cada factor. Sin embargo, para este estudio, se consideró que la información recolectada de cada caso de inestabilidad no era suficiente para realizar dicho proceso, ya que se deben considerar factores geotécnicos y ambientales que no pudieron ser evaluados. Por tanto, se asignó un porcentaje de peso igual a cada uno de los tres factores.

Luego, se realizó la suma aritmética de los factores de susceptibilidad de las tres cartografías, obteniendo los valores finales de susceptibilidad relativa. Estos valores se distribuyeron en cinco intervalos iguales, correspondientes a las categorías: muy bajo, bajo, moderado, alto y muy alto.

4.2. Mapa inventario

González-Huesca *et al.* (2015) sugiere que una forma de apoyar el análisis de susceptibilidad es mediante la elaboración de un inventario de eventos de PRM, el cual es representado en un mapa para indicar los sitios específicos de ocurrencia de casos de inestabilidad de laderas en el área de estudio.

Para ello, se analizaron diez eventos de PRM ocurridos entre 2006 y 2024, de los cuales tres se consideraron dentro de los más significativos, debido a la magnitud de sus efectos en cuanto a pérdidas de vidas humanas y daños a la infraestructura (ver tabla 3). Se llevaron a cabo visitas de campo en los sitios de ocurrencia, recopilando información básica de cada evento como la ubicación (coordenadas UTM), tipo de proceso (utilizando la clasificación básica propuesta por Mendoza y Domínguez (2006), que distingue entre caídas, derrumbes, flujos y deslizamientos), tipo de material involucrado, cobertura vegetal y evidencias de inestabilidad de laderas. Cabe destacar que para los eventos anteriores a 2023, la caracterización de los sitios se basó en información documental, esto debido a que las cicatrices de los PRM están mayormente cubiertas por vegetación.

Tabla 3: Casos de PRM más significativos en el ANP entre 2006 y 2024. Elaboración propia con información de Domínguez-Morales (2021); Municipios (2013, 2016); Hernández-Alcántara (2006) y Munive-García et al. (2023).

Ubicación	Fecha
Necaxa, Puebla	07-Sep-2006
(Carretera México-Tuxpan, km 106)	
Cuaxicala, Puebla	14-Sep-2013
Xaltepec, Puebla	06-Ago-2016

La información recopilada se organizó en una base de datos, lo cual permitió generar una capa de puntos georreferenciados para representarlos en los mapas correspondientes. La información hidrográfica representada en los mapas se derivó de la Red Hidrográfica Digital de México, Escala 1:250,000, Edición 1.0 de INEGI (2006). Las localidades y la red de carreteras y caminos se obtuvieron a partir de los conjuntos de datos vectoriales de las cartas topográficas F14D83 Huauchinango y F14D84 Filomeno Mata, escala 1:50,000 de la serie III de INEGI (2013a) e INEGI (2013b), respectivamente. Finalmente, la red de canales de drenaje se determinó con la ayuda del SIG, utilizando los datos de elevación del CEM.

5. Resultados y Discusión

Inicialmente, los mapas de pendiente y elevación (ver figuras 4 y 5) confirmaron la coherencia de los resultados de análisis con SIG, evidenciando que al noreste del ANP, donde las pendientes superan los 45°, se registran las elevaciones más bajas, alcanzando alrededor de 291 msnm. Este patrón topográfico caracteriza al valle fluvial del río Necaxa, conocido también como barranca de Patla, que se conecta con el río Tecolutla hacia el este. La presencia de este barranco profundo coincide con la descripción de Lugo-Hubp et al. (2005), quien resalta la presencia de valles fluviales pronunciados en los barrancos y cauces de las zonas Central y Septentrional de la Ladera Superior de la SNP, hacia el noreste del ANP (ver figura 2).

La generación del mapa que muestra los resultados del análisis de susceptibilidad (ver figura 6) permitió clasificar con éxito el territorio del ANP en cinco categorías de susceptibilidad: muy alta, alta, moderada, baja y muy baja, utilizando una gama de colores estandarizada para mapas de riesgo (González-Huesca et al., 2015).

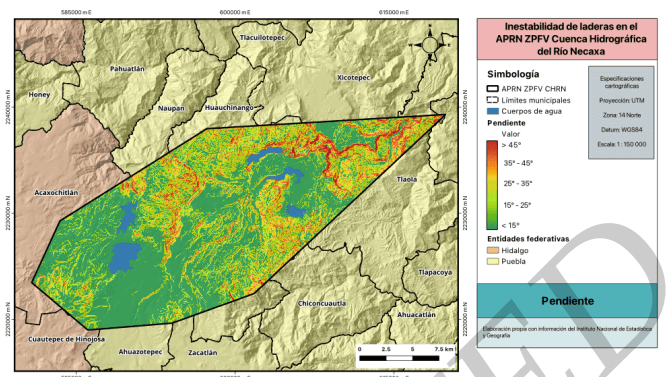


Figura 4: Mapa que muestra la distribución de las pendientes, en grados, dentro del ANP. El color rojo representa pendientes mayores a 45° y el color verde oscuro las menores a 15°.

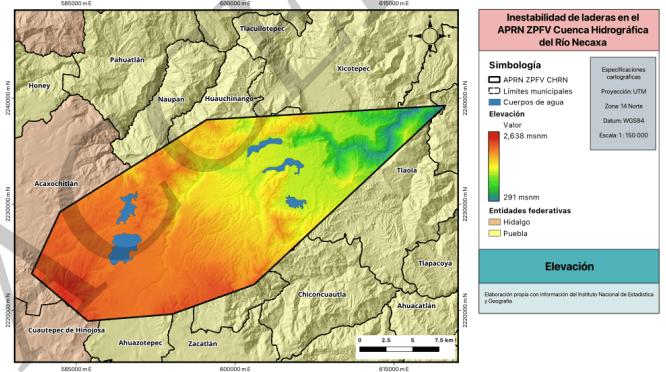


Figura 5: Mapa que muestra la distribución de la elevación dentro del ANP. Los colores cálidos indican zonas de mayor altitud, mientras que los colores fríos indican zonas de menor altitud.

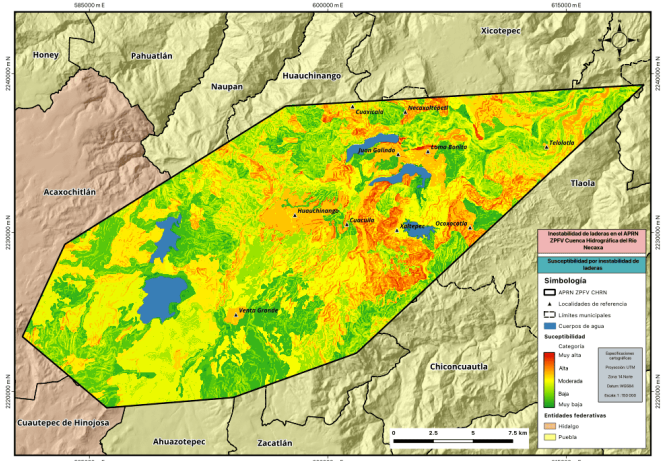


Figura 6: Mapa que muestra la susceptibilidad por inestabilidad de laderas en el ANP. El color rojo representa las zonas con el riesgo mayor, y el color verde las zonas con menor riesgo.

En la porción sudoccidental de la CHRN, el índice de susceptibilidad predominante es de bajo a muy bajo. Esto refleja que las características naturales del terreno no favorecen la

inestabilidad de las laderas: las pendientes no superan los 25° de inclinación, la litología superficial está compuesta principalmente por rocas volcánicas precuaternarias muy resistentes a la erosión, el relieve presenta extensas planicies y montañas de corta longitud, y hay poca presencia de zonas urbanas y una baja densidad de carreteras y caminos.

Hacia el noreste, el grado de susceptibilidad aumenta notablemente. La mayor parte de la zona metropolitana del municipio de Huauchinango presenta una susceptibilidad alta, y las áreas circundantes a las presas de Necaxa y Tenango de las Flores muestran un riesgo de moderado a alto. Este incremento en la susceptibilidad se explica por el cambio en la geología y el relieve del ANP, donde los sectores centro y nororiental están dominados por rocas sedimentarias principalmente Jurásicas, caracterizadas por estructuras plegadas y erosión diferencial que forman valles y barrancos con pendientes pronunciadas.

La mayor concentración de susceptibilidad alta a muy alta se encuentra en los sectores centro, centro-sur y centro-noreste del ANP, especialmente en los municipios de Huauchinango, Juan Galindo y el extremo sudoccidental de Tlaola, en la región de Ocoxacotla. Esto es resultado de las profundas transformaciones del paisaje provocadas por actividades antropogénicas, como asentamientos urbanos y el desarrollo de infraestructura. Estas actividades han reducido o eliminado la cobertura vegetal, lo que intensifica los procesos erosivos en el terreno, favoreciendo la inestabilidad de las laderas. Otras localidades con condiciones similares incluyen Venta Grande, Cuacuila, Xaltepec, Loma Bonita, Cuaxicala y Necaxaltépetl (ver figura 6).

La información recopilada para la creación del inventario reveló que la mayoría de los eventos de PRM en el ANP corresponden a flujos de tierra, lodo y detritos, con menos casos de caídas y un deslizamiento traslacional notable en la carretera Huauchinango-Xicotepec (ver figura 7). La caracterización en campo mostró que para los dos últimos tipos, el material involucrado consistió en rocas sedimentarias, específicamente calizas y lutitas del Jurásico (de las formaciones Tamán y Pimienta) (García-Rodríguez, 2017). Por otro lado, para los flujos de tierra, lodo y detritos, el material involucrado se trató de suelos volcánicos y materiales intemperizados poco consolidados (Lugo-Hubp et al., 2005).

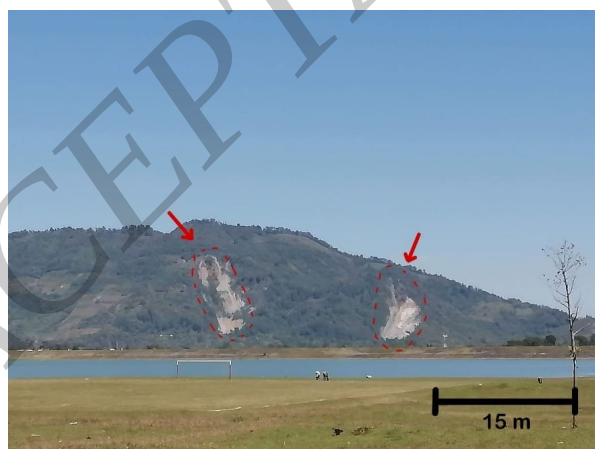


Figura 7: Cicatrices de PRM sobre la carretera Huauchinango-Xicotepec. Vista al noreste, desde la presa de Tenango de las Flores. Fotografía del autor, 2024.

Se encontró que el factor desencadenante de la mayoría de

los casos fue de tipo natural, excepto en una instancia donde un flujo de lodo se debió a la fractura de una tubería de agua (ver figura 8). En aquellos casos detonados de forma natural, el 90 % se atribuye a precipitaciones extraordinarias.



Figura 8: Flujo de lodo sobre el camino A Puga, ocasionado por la fractura de una tubería de agua, en Huauchinango, Puebla. Vista al oeste. Fotografía del autor, 2024.

Aunque el presente estudio no incluyó un análisis detallado de las precipitaciones, ya que no formaba parte de los objetivos principales, se recurrió a fuentes alternativas para confirmar el papel de las lluvias extraordinarias como factor desencadenante de los PRM más significativos. A través de la consulta de notas periodísticas (Municipios, 2013, 2016; Hernández-Alcántara, 2006) y del registro de climatología diaria de la estación meteorológica Huauchinango (clave 21118, ubicada en las coordenadas UTM 598117 m E y 2231346 m N, ver figura 9) (SMN, 2020), se logró corroborar la ocurrencia de precipitaciones intensas antes de los eventos críticos, como se muestra a continuación.

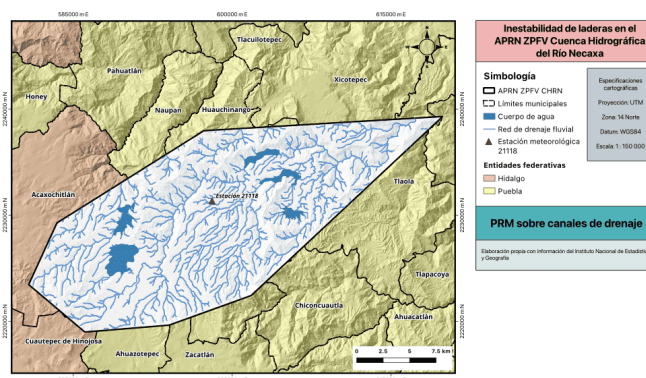


Figura 9: Mapa que muestra la capa de puntos de los PRM registrados para el inventario, sobre la red de canales de drenaje fluvial en el ANP. Se observa la ubicación de la estación meteorológica Huauchinango, con clave 21118.

En el caso de Cuaxicala en 2013, se registró un valor de lluvia acumulada de 119 mm un día previo al siniestro, clasificándose como precipitación intensa (de 75 a 150 mm). Para el evento de Xaltepec en 2016, el día específico de la ocurrencia se registró una lluvia acumulada de 265.5 mm, de tipo torrencial (>150 mm). En cuanto al evento cercano a la carretera

México-Tuxpan en 2007, según Hernández-Alcántara (2006), se registró un valor acumulado de 51.5 mm, clasificándose como lluvia muy fuerte (de 50 a 75 mm) (SMN, 2024) (ver tabla 4). Aunque esta última no es tan severa en comparación con las dos primeras, se evidencia que, ante condiciones de inestabilidad de laderas, las lluvias que registran valores acumulados desde 50 mm pueden desencadenar un PRM importante.

Tabla 4: Casos de PRM más significativos en el ANP y precipitaciones asociadas (2006-2024). Elaboración propia con información de Municipios (2013, 2016); Hernández-Alcántara (2006) y SMN (2024).

Evento	Precipitación acumulada	Clasificación de lluvia
Necaxa, Puebla	51.5 mm	Precipitación muy fuerte (50 a 75 mm)
Cuaxicala, Puebla	119 mm	Precipitación intensa (75 a 150 mm)
Xaltepec, Puebla	265.5 mm	Precipitación torrencial (>150 mm)

En promedio, los eventos más destructivos en el área de estudio ocurrieron bajo condiciones de precipitaciones intensas a torrenciales, con un valor acumulado cercano a los 145 mm. Aunque este valor ofrece una referencia preliminar de las condiciones de lluvia que pueden desencadenar deslizamientos de tierra significativos, su interpretación debe tomarse con precaución debido al número limitado de eventos considerados. Futuras investigaciones con una muestra más amplia de eventos podrían confirmar o ajustar esta tendencia.

La georreferenciación de los casos de PRM entre 2006 y 2024 permitió la generación de un mapa que muestra su localización precisa (ver figura 10). Su análisis reveló que el 90 % de los casos estudiados tuvieron lugar en áreas urbanas. Específicamente, el 70 % de estos incidentes ocurrieron en carreteras y caminos (ver figuras 7, 8 y 11), lo cual es una situación común en los estados ubicados en las vertientes del Golfo de México y del Pacífico, según lo indicado por Munive-García *et al.* (2023).

Esto se explica por la posibilidad de que, en ciertos casos, las operaciones de corte en carreteras, la expansión de vías y las excavaciones sean llevadas a cabo de manera inapropiada, ya sea sobre taludes subverticales o en las cercanías de comunidades establecidas al pie de la ladera. Esta situación puede resultar en un incremento de la vulnerabilidad física. Un ejemplo notable es el PRM ocurrido en Cuaxicala en 2013, atribuido a un corte “mal ejecutado” en un lugar destinado a la extracción de material pétreo durante las etapas finales de la construcción de la autopista México-Tuxpan (Municipios, 2013). De este modo, queda reflejado que el aumento en la vulnerabilidad está dado por la presencia de valores altos de susceptibilidad y elementos puntuales expuestos. Es decir, una comunidad con infraestructuras viales débiles y condiciones del terreno inestables es más vulnerable ante un deslizamiento de tierra.

Al superponer la capa que muestra los casos de PRM sobre el mapa de pendientes, se identificó una tendencia marcada de eventos significativos en taludes con inclinaciones mayores a 45° (ver figuras 10 y 4). Además, el cálculo de la red de drenajes naturales a partir del modelo digital de elevaciones mostró que el 80 % de los casos ocurrieron en áreas cercanas o precisamente sobre canales de drenaje fluvial (ver figura 9). Dado que

el factor desencadenante principal se atribuye a intensas precipitaciones, los canales de drenaje representan zonas de riesgo natural con una intensidad comparable a las áreas con pendientes pronunciadas y con presencia de zonas urbanas y vías terrestres.

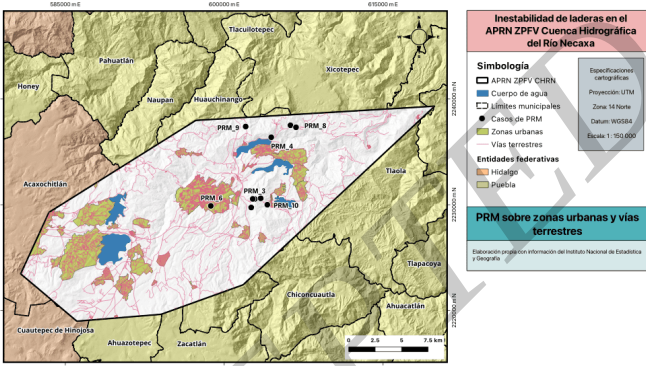


Figura 10: Mapa que muestra la capa de puntos de los PRM registrados para el inventario, sobre las carreteras/caminos y zonas urbanas dentro del ANP. El punto PRM_3 hace referencia a un caso de caída de rocas sobre la carretera Cuacuilá-Xaltepec; el PRM_4 al caso del 7-sep-2006 en el km 106 de la carretera México-Tuxpan; el PRM_6 al flujo de lodo sobre el camino A Puga; el PRM_8 a un deslizamiento traslacional sobre la carretera Huauchinango-Xicotepec; el PRM_9 al caso de Cuaxicala en 2013; y el PRM_10 al caso de Xaltepec en 2016.



Figura 11: PRM sobre la carretera Cuacuilá-Xaltepec, en Huauchinango, Puebla. Vista al sureste. Fotografía del autor, 2024.

Al ser considerada el área de estudio una Zona Protectora Forestal Vedada, es notable la ausencia de zonas deforestadas significativas. Sin embargo, el análisis de la información consultada sobre la cobertura vegetal y uso de suelo muestra que en algunas zonas destinadas actualmente para cultivos anuales,

se tratan de áreas que anteriormente estaban cubiertas por la vegetación circundante. Este fenómeno es visible tan sólo en la carretera Huauchinango-Xicotepec a la altura de Nezohaya, en donde se aprecian zonas de cultivo en las laderas de los cerros que tuvieron que haber sido deforestadas previamente.

Las zonas deforestadas recurrentemente condicionan aún más la estabilidad de las laderas, dado que no hay presencia de vegetación que actúe como un anclaje natural del suelo ante los escurrimientos de agua proveniente de las partes más altas de los cerros, especialmente durante las precipitaciones. Este fenómeno también refleja coherentemente que en el mapa de susceptibilidad (ver figura 6) se exhiba un índice de riesgo muy alto en concordancia con la distribución de las carreteras y la inclinación de los taludes.

6. Conclusiones

La aplicación de la metodología propuesta por Mendoza y Domínguez (2006) y González-Huesca *et al.* (2015) para el análisis de la inestabilidad de laderas con un enfoque centrado en la evaluación de la susceptibilidad, permitió identificar cuantitativamente las zonas del área de estudio en donde las condiciones del terreno favorecen la ocurrencia de procesos de remoción en masa y representarlas visualmente en un mapa que categoriza el riesgo a partir del índice de susceptibilidad, utilizando una gama de colores que facilita su interpretación. La información cartográfica utilizada para el estudio de susceptibilidad resultó adecuada en cuanto a la escala a nivel regional. Sin embargo, siempre resulta ideal el uso de escalas de detalle a nivel local (1:15,000 a 1:20,000) para llevar a cabo un análisis más preciso.

Por otro lado, el hecho de que la metodología empleada para el análisis de susceptibilidad solamente considera los factores condicionantes de la inestabilidad de las laderas, resultó adecuada y complementaria a la creación del inventario de los casos de PRM al interior del ANP y su correspondiente mapa, para: 1) confirmar la presencia e influencia de los factores condicionantes de la inestabilidad de laderas en los sitios donde ya han ocurrido PRM; y 2) establecer los factores desencadenantes que dieron lugar, de manera súbita, a la ocurrencia de estos fenómenos.

De este modo, se establece que los factores condicionantes que influyen en la estabilidad de las laderas al interior del ANP, son: 1) la inclinación de los taludes. A partir del cálculo de pendientes se determinó que los eventos más significativos de desastres relacionados con PRM tienden a ocurrir en zonas con pendientes superiores a 45°; 2) la cercanía a los canales de drenaje fluvial. El cálculo de la red de canales de drenaje reveló que las zonas con presencia de estos sitios se asocia directamente con la ocurrencia de los PRM más intensos; 3) la geología y el relieve. Se logró identificar una notable diferenciación entre el índice de susceptibilidad bajo a muy bajo exhibido en las zonas donde la litología superficial consiste de rocas volcánicas y un relieve asociado con llanuras y estructuras volcánicas, y por otro lado, un índice alto a muy alto en las zonas donde predominan rocas sedimentarias (calizas y lutitas) con un relieve accidentado determinado por estructuras plegadas y valles fluviales profundos en “V”; y 4) la presencia de zonas urbanas y vías terrestres. Se observó que los PRM constitu-

yen un mayor riesgo de desastre si se presentan en áreas cercanas a asentamientos urbanos o sobre caminos y carreteras, donde más comúnmente ocurren (Zamorano *et al.*, 2016; García-Rodríguez, 2017; Alcantara-Ayala, 2004; Galindo-Serrano y Alcántara-Ayala, 2015; Munive-García *et al.*, 2023).

Además, se reveló que la presencia de áreas deforestadas destinadas a cultivos anuales, dispuestas sobre las laderas de los cerros, en algunos casos aumentan considerablemente la susceptibilidad, ya que no hay una masa forestal densa que sirva como anclaje para el suelo. Sin embargo, la ocurrencia de casos como el de Cuaxicala en 2013 reveló que, a pesar de la presencia de extensas zonas boscosas con vegetación densa al interior del ANP, los PRM continúan siendo un riesgo recurrente durante las épocas de lluvia. Esto sugiere que la presencia de vegetación densa no garantiza la prevención de deslizamientos de tierra.

En este contexto, el análisis de los casos del inventario, junto con la consulta de los datos de precipitación obtenidos de fuentes periodísticas y de la estación meteorológica 21118, confirma que las lluvias severas son el factor desencadenante más recurrente de los PRM dentro del ANP. En particular, se observó que precipitaciones con un valor acumulado cercano a los 145 mm, clasificadas como lluvias intensas a torrenciales, jugaron un papel decisivo en los deslizamientos de tierra más destructivos en el área de estudio.

Por lo tanto, se recomienda profundizar en el estudio de los fenómenos hidrometeorológicos como desencadenantes de PRM en la región, a través de un análisis más detallado de los patrones de precipitación. Esto permitiría establecer una correlación objetiva y robusta entre la intensidad de las lluvias y los deslizamientos de tierra, facilitando la creación de un índice de alerta temprana que ayude a mitigar los riesgos asociados a estos fenómenos en el futuro.

Finalmente, se sugiere llevar a cabo monitoreos sistemáticos en cada uno de los sitios considerados en riesgo por inestabilidad de laderas, y en aquellos donde ya se ha identificado evidencia de desplazamientos en masa. Esto con la finalidad de evaluar la viabilidad de implementar métodos de estabilización o de reordenamiento territorial, idealmente (Suárez-García, 2006; Paz-Tenorio *et al.*, 2017).

Agradecimientos

Los autores agradecen los valiosos comentarios y sugerencias de los revisores anónimos.

Referencias

- Alcántara-Ayala, I. (2000). Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? definición, clasificaciones y terminología. *Investigaciones geográficas*, 41:7–25. doi:https://doi.org/10.14350/ig.59101.
- Alcantara-Ayala, I. (2004). Hazard assessment of rainfall-induced landsliding in Mexico. *Geomorphology*, 61(1):19–40. doi:https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2003.11.004.
- CONANP (2010). Ficha simec de la zona protectora forestal vedada cuenca hidrográfica del río necaxa. Consultado el 16 de febrero de 2024 de https://simec.conanp.gob.mx/ficha.php?anp=117®=5.
- CONANP (2013). Estudio previo justificativo para la modificación de la declaratoria del Área de protección de recursos naturales zona protectora forestal vedada cuenca hidrográfica del río necaxa ubicada en los estados de Hidalgo y Puebla. 74 p. + 6 Anexos para un total de 121 p. Disponible en: https://www.conanp.gob.mx/datos_abiertos/DGCD/12.pdf.

- Cruden, D. (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*, 43(1). doi:<https://doi.org/10.1007/BF02590167>.
- Domínguez-Morales, L. (2021). Eventos más significativos documentados por el cenapred de 1999 a 2020. Recuperado el 10 de febrero de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/638512/>.
- Galindo-Serrano, J. A. y Alcántara-Ayala, I. (2015). Inestabilidad de laderas e infraestructura vial: análisis de susceptibilidad en la sierra nororiental de Puebla, México. *Investigaciones geográficas*, 88:122–145. doi:<https://doi.org/10.14350/ig.43790>.
- García-Rodríguez, F. (2017). Predicción de la susceptibilidad por deslizamientos en el sistema hidrológico necaxa, Puebla, México. [Tesis de maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en: <https://repositorio.unam.mx/contenidos/prediccion-de-la-susceptibilidad-por-deslizamientos-en-el-sistema-hidrologico-necaxa-puebla-mexico>.
- González-Huesca, A., Domínguez-Morales, L., y Castañeda-Martínez, A. (2015). Generación de insumos para el atlas nacional de riesgos. mapa nacional de susceptibilidad por inestabilidad de laderas. Secretaría de Gobernación, CENAPRED, México, 73 p.
- Hernández-Alcántara, M. (2006). Derrumbe en necaxa deja al menos cuatro personas muertas y 11 más lesionadas. Nota periodística. Recuperado el 3 de febrero de 2024 de <https://www.lajornadadeoriente.com.mx/2006/09/08/puebla/pue103.php>.
- INEGI (2006). Red hidrográfica digital de México escala 1:250 000 edición 1.0. Recuperado el 20 de febrero del 2024 de <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463598428>.
- INEGI (2013a). Conjunto de datos vectoriales de información topográfica f14d83 huauchinango escala 1:50 000 serie iii. Recuperado el 1 de febrero del 2024 de <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825717438>.
- INEGI (2013b). Conjunto de datos vectoriales de información topográfica f14d84 filomeno mata escala 1:50 000 serie iii. Recuperado el 1 de febrero del 2024 de <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=70282571091>.
- Lario-Gómez, J. y Bardají-Azcárate, T. (2017). *Introducción a los riesgos geológicos*. Editorial UNED.
- Lugo-Hubp, J., Zamorano-Orozco, J. J., Capra, L., Inbar, M., y Alcántara-Ayala, I. (2005). Los procesos de remoción en masa en la sierra norte de Puebla, octubre de 1999: causa y efectos. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22(2):212–228.
- Mendoza, M. y Domínguez, L. (2006). *Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Fenómenos Geológicos*, capítulo V. Estimación del peligro y el riesgo de deslizamientos en laderas, p. 76. CENAPRED.
- Municipios (2013). Derrumbe en cuaxicala fractura tres ductos de pemex. Nota periodística. Recuperado el 3 de febrero de 2024 de <https://municipiospuebla.mx/nota/2013-09-15/huauchinango/derrumbe-en-cuaxicala-fractura-tres-ductos-de-pemex>.
- Municipios (2016). La tormenta que le quitó el sueño a toda una comunidad de huauchinango. Nota periodística. Recuperado el 3 de febrero de 2024 de <https://municipiospuebla.mx/nota/2016-09-04/huauchinango/la-tormenta-le-quit>.
- Munive-García, M., Domínguez-Morales, L., y Gómez-Hernández, L. (2023). Prevención de riesgos por inestabilidad de laderas en caminos y cortes carreteros. Secretaría de Gobernación, CENAPRED, México, 73 p.
- Paz-Tenorio, J., González-Herrera, R., Gómez-Ramírez, M., y Velasco-Herrera, J. (2017). Metodología para elaborar mapas de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, análisis del caso ladera sur de tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Investigaciones geográficas*, 92:0–0. doi:<https://doi.org/10.14350/ig.52822>.
- SMN (2020). Información estadística climatológica. Recuperado el 3 de marzo del 2024 de <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>.
- SMN (2024). Pronóstico meteorológico general. Recuperado el 23 de junio del 2024 de <https://smn.conagua.gob.mx/es/pronosticos/pronosticossubmenu/pronostico-meteorologico-general>.
- Suárez-García, O. G. (2006). Susceptibilidad a deslizamientos en la sierra madre oriental. [Tesis de maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en: <https://repositorio.unam.mx/contenidos/susceptibilidad-a-deslizamiento-de-laderas-en-la-sierra-madre-oriental>.
- Uribe-Alcántara, E. M., Corral-Plata, F., Cruz-Chavez, E., y Escamilla-Casas, J. C. (2019). Desarrollo y aplicación de una metodología para la elaboración de mapas de peligro municipales por deslizamientos de terreno mediante sistemas de información geográfica. *Pádi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 7(13):29–34. doi:<https://doi.org/10.29057/icbi.v7i13.3439>.
- Zamorano, O. J., Lugo-Hubp, J., Figueroa, G. J., y Quijada, M. I. (2016). *Geografía de México: una reflexión espacial contemporánea*, capítulo 2. El relieve mexicano: una superficie de contrastes. UNAM. Instituto de Geografía. Disponible en: https://geodigital.igg.unam.mx/geografia_mexico/index.html/interior_1.html.